УДК: 550.388.2 DOI: 10.26907/rwp29.2025.512-515

АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЙ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ И КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ F2 С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

А.М. Аппалонов, Ю.С. Масленникова, О.Н. Шерстюков

Казанский федеральный университет, 420008, г. Казань, ул. Кремлёвская, 18
E-mail: artem309_97@mail.ru

Аннотация. В работе представлен новый способ разложения глобальных карт полного электронного содержания ионосферы при помощи нейронных сетей типа автокодировщик с дополнительным учетом на входе данных о критической частоте главного максимума ионизации foF2, взятых с сети лабораторий GIRO (GLOBAL IONOSPHERE RADIO OBSERVATORY). Это позволило повысить качество восстановления исходных карт (ошибка по метрике mean absolute error понизилась с 0.32 до 0.15 на тестовой выборке), что, впоследствии, может быть так же использовано для реализации новой модели прогнозирования полного электронного содержания.

Ключевые слова: ионосфера; полное электронное содержание; карты ПЭС; нейронные сети; автокодировщик; критическая частота foF2

JOINT ANALYSIS OF SPATIAL-TEMPORAL VARIATIONS OF TOTAL ELECTRON CONTENT AND CRITICAL FREQUENCY OF THE F2 LAYER USING DEEP LEARNING NEURAL NETWORKS

A.M. Appalonov, Y.S. Maslennikova, O.N. Sherstyukov

Abstract. The research presents a new method for decomposing global maps of the total electronic content of the ionosphere using neural networks of the autoencoder type, with additional input data on the critical frequency of the main maximum of foF2 ionization taken from the GIRO laboratory network (GLOBAL IONOSPHERE RADIO OBSERVATORY). This made it possible to improve the quality of recovery of the original maps (the mean absolute error metric decreased from 0.32 to 0.15 in the test dataset), which, subsequently, can also be used to implement a new model for predicting the total electronic content.

Keywords: ionosphere; total electron content (TEC); TEC maps; neural networks; autoencoder; critical frequency foF2

Введение

Полное электронное содержание (ПЭС) ионосферы – ключевой параметр, характеризующий распределение электронов в верхних слоях атмосферы. Исследование ПЭС критически важно для понимания влияния ионосферы на радиосвязь, спутниковую навигацию и космическую погоду. Изменения ПЭС, вызванные солнечной активностью или геофизическими явлениями, могут вызывать ошибки в GPS-сигналах и нарушения радиосвязи. Мониторинг ПЭС позволяет разрабатывать методы коррекции этих эффектов, повышая точность навигации и устойчивость коммуникационных систем. Кроме того, изучение ПЭС способствует прогнозированию космической погоды и пониманию взаимодействия Солнца с магнитосферой Земли [1].

Критическая частота foF2 – это максимальная частота радиоволн, способных отражаться от слоя F2 ионосферы, наиболее плотного и устойчивого слоя. Учёт foF2 имеет ключевое значение для радиосвязи, навигации и изучения ионосферной динамики. Эта частота напрямую зависит от электронной плотности, которая изменяется под влиянием солнечной активности, времени суток и сезонных факторов. Игнорирование foF2 может привести к ошибкам в прогнозировании радиотрасс, нарушению связи и снижению точности спутниковой навигации. Исследование foF2 также помогает анализировать воздействие космической погоды на Землю, что важно для защиты технологической инфраструктуры [2].

Целью работы является сравнение разложений глобальных карт полного электронного содержания ионосферы при помощи нейронных сетей глубокого обучения без использования дополнительных параметров на входе и с учетом значений критической частоты максимума ионизации foF2.

Решаемые задачи:

1. Подготовить базы данных карт ПЭС, предварительная фильтрация данных для уменьшения влияния суточной и сезонной периодичности.
2. Провести разложение карт ПЭС с использованием нейронной сети типа автокодировщик.
3. Провести разложение карт ПЭС при помощи подачи на вход нейронной сети значений критической частоты foF2.
4. Сравнить результатов двух разложений.

Текст доклада печатается с интервалом в 18 pt после ключевых слов на английском языке. Шрифт Times New Roman, размер шрифта – 11 pt, межстрочный интервал – одинарный. Выравнивание текста доклада – по ширине. Автоматический перенос, ширина зоны переноса 0.63 см.

Красная строка (отступ) – 0.75 см, абзацы четко обозначены. Поля 2.5 см по всем сторонам. Запрет висячих строк обязателен. Страницы не нумеруются.

Заголовки секций печатаются полужирным шрифтом 11 pt и помещаются в середине строки. Перед заголовком секции вертикальный интервал 12 pt.

Предварительный обработка данных

В настоящей работе были использованы глобальные карты ПЭС, полученные лабораторией JPL (NASA Jet Propulsion Laboratory), которая является одной из пяти ведущих аналитических лабораторий, обеспечивающих построение глобальных карт абсолютного вертикального значения ПЭС ионосферы путем интерполяции данных, получаемых на мировой сети приемников IGS. Прогностические модели, построение по таким картам ПЭС, являются наиболее приемлемым с практической точки зрения способом, позволяющим обеспечить потребителей информацией о пространственно-временном распределении ПЭС [3].

Карты ПЭС представлены в географической системе координат с пространственным диапазоном по долготе -180º до 180º (с разрешением 5º) и диапазоном по широте -87.5º до 87.5º (с разрешением 2.5º). Карты доступны на официальном сайте JPL в формате IONEX (Ionosphere Map Exchange) по шкале мирового времени UT с временным разрешением 2 часа. В настоящей работе были использованы карты ПЭС за период с 1 января 1999 по 31 октября 2024 года.

Перед тем как проводить разложения, данные необходимо предварительно отфильтровать того, чтобы уменьшить влияние суточной и сезонных периодичностей. Так как они будут вносить наибольший вклад в динамику первых компонент разложения ПЭС.

В работе [4] показано, что результат анализа главных компонент существенно зависит от методики предварительной обработки данных, используемой системе координат и методике центрирования данных. Следуя рекомендациям из [4], при анализе главных компонент были предварительно исключены доминирующие периодичности (суточная и сезонная), а также учтены особенности сферической системы координат, которая используется при построении карт ПЭС. При задании условия ортогональности базисных векторов необходимо учитывать, что значения ПЭС представлены в сферической системе координат в точках, равноотстоящих по широте и долготе. Таким образом, различным узлам координатной сетки соответствуют различные площади на земной поверхности. Применительно к данным ПЭС учет координатной сетки производится путем домножения каждого отсчёта $X_{t,l}$ на величину $\sqrt{\cos\phi_t}$, где ϕ_t – широта соответствующего узла сетки.

Информация о критической частоте foF2 была взята с сети глобальных ионосферных станций GIRO (Global Ionospheric Radio Observatory) – это международная сеть, объединяющая ионосферные станции, оснащённые ионозондами – устройствами для исследования ионосферы. Ионозонды излучают радиоволны и анализируют их отражение от ионосферных слоёв, что позволяет измерять ключевые ионосферные параметры. Станции расположены по всему миру, что позволяет изучать ионосферу в разных географических и геофизических условиях (рис. 1) [5].

Рис. 1. Расположение сети глобальных ионосферных станций GIRO (Global Ionospheric Radio Observatory (январь 2020)

Метод разложения глобальных карт ПЭС ионосферы при помощи нейронной сети

В задачах сжатия и разложения многомерных данных часто применяются нейронные сети типа «автокодировщик» (autoencoder) [6]. Такой алгоритм применяется, например, для обучения эффективных представлений данных (т.е. повторения «входа на выходе»), что существенно снижает размерность и позволяет извлечь максимум полезной информации.

Нейронная сеть типа «автокодировщик» состоит из двух основных блоков: кодировщика (encoder) и декодировщика (decoder):

– Кодировщик принимает исходные данные и преобразует их в сжатое представление так называемое латентное пространство. В кодировщике присутствуют эмбеддинги (embeddings) – векторы более низкой размерности в скрытом пространстве, соответствующие векторам исходных данных. Размерность скрытого слоя равна 10.

– Декодировщик отвечает за восстановление исходных данных из скрытого представления. Обычно его архитектура зеркальна архитектуре кодировщика: он увеличивает размер вектора, стремясь вернуть его к исходным характеристикам.

Для обучения алгоритма и оценки качества его работы исходная выборка была поделена следующим образом: 80% данных (89 600 карт) непосредственно для тренировки модели; 20% (22 500 карт) – для валидации алгоритма.

Отметим, что полученные векторы скрытого слоя автокодировщика могут быть скоррелированы между собой и, как следствие, полученное разложение может быть некачественное и сложно интерпретируемое. В рассматриваемом случае условие ортогональности векторов было реализовано при помощи вспомогательного слоя, который инициализирует веса для скрытого слоя линейного преобразования ортогональной матрицей с использованием QR-разложения [7].

В рамках второго подхода на вход нейронной сети помимо исходных карт подавались также значения критической частоты foF2. Из-за того, что в основе алгоритма лежит полносвязный нейросетевой слой, это позволяет учитывать взаимодействие точек одинаковых координат на картах ПЭС и значений их частоты foF2.

Ниже представлена таблица сравнения результатов восстановления карт полного электронного содержания ионосферы без добавления и с добавление частоты foF2 на тестовой выборке. В качестве метрик были выбраны:

– MAE (mean absolute error, средняя абсолютная ошибка);

– RMSE (root mean square error, средняя квадратическая ошибка);

– WAPE (weighted absolute percentage error, взвешенная абсолютная процентная ошибка).

Таблица 1. Сравнение результатов разложения

МЕТРИКА	Автокодировщик (только карты ПЭС)	Автокодировщик (карты ПЭС + foF2)
MAE	0.32	0.15
RMSE	0.41	0.21
WAPE	0.14	0.11

Заключение

Предложенный метод разложения глобальных карт ПЭС ионосферы использует нейронную сеть типа «автокодировщик». Для получения некоррелированных данных скрытого слоя нейросетевой модели был реализован вспомогательный полносвязный слой, способный ортогонализировать новое векторное представление нейронной сети в пространстве скрытого слоя. При добавлении на вход данных о критической частоте ионизации главного максимума foF2, качество восстановление улучшается.

Список литературы

1. Mendillo M. Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content // Reviews of Geophysics. – 2006. – V. 44. – № 4. https://doi.org/10.1029/2005RG000193.
2. Danilov, A.D. and Konstantinova, A.V., Trends in foF2 and the 24th solar activity cycle, Adv. Space Res. – 2020. – Vol. 65. – P. 959–965. https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.10.03
3. NASA Jet Propulsion Laboratory. – URL: https://iono.jpl.nasa.gov/ (дата обращения: 15.03.2025).
4. Maslennikova Yu. S., Bochkarev V. V. Principal Component Analysis of Global Maps of the Total Electronic Content // Geomagnetism and Aeronomy. – 2014. – Vol. 54(2). – P. 216–223. https://doi.org/10.1134/s0016793214020133.
5. Global Ionospheric Radio Observatory. Режим доступа: https://giro.uml.edu/ (дата обращения: 15.03.2025).
6. Аппалонов А.М., Масленникова Ю.С. Шерстюков О.Н. Применение нейронных сетей глубокого обучения для анализа пространственных и временных компонент разложения полного электронного содержания ионосферы // Радиотехника. – 2025. – Т. 89. – № 1. – С. 172−179. https://doi.org/10.18127/j00338486-202501-16/
7. Iwasawa, Kenkichi. On Some Types of Topological Groups // Annals of Mathematics. – 1949. – No. 50 (3). – P. 507–558. https://doi.org/ doi:10.2307/1969548. JSTOR 1969548.